第38卷 第4期
2021年7月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 4
Jul. 2021

黄土区不同土地利用类型下砂质壤土地表CO_2通量变化特征——以清凉寺沟流域为例

许志平[1]， 邵天杰[1]， 张连凯[2]， 邵明玉[2]， 牛俊杰[3]

（1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院，陕西 西安 710119；2. 中国地质科学院岩溶地质研究所，广西 桂林 541004；3. 太原师范学院汾河流域科学发展研究中心，山西 太原 030012）

摘　要： 利用LI-8100A土壤碳通量自动测量系统对晋西北黄土丘陵沟壑区清凉寺沟流域地表土壤CO_2通量进行测量，探讨了CO_2通量时空变化特征、不同土地利用类型下的CO_2通量特征以及环境因子对CO_2通量的影响，对于晋西北黄土丘陵沟壑区小流域地区地表土壤CO_2通量的研究进行补充。结果表明：(1) CO_2通量在生长季呈现单峰变化，于日出前后达单日最低值，在16:00—22:00达到单日最高值；在非生长季则呈现不规律变化。(2) 农耕地的CO_2通量相较于荒草地以及枣林地的CO_2通量要低；不同季节的CO_2通量关系为8月CO_2通量最大，5月CO_2通量次之，11月CO_2通量最低。(3) 地表土壤CO_2通量与光合有效辐射、大气温度、土壤温度、土壤含水率、土壤有机质、土壤质地等因素密切相关，通过科学的土地利用方式可有效提高土壤的固碳能力。

关键词： 土壤CO_2通量；时空变化特征；影响因素；土地利用类型；黄土丘陵沟壑区；晋西北

地表CO_2通量作为碳循环的关键一环，成为目前全球变暖研究必不可少的关键内容之一。作为土壤碳库以及大气碳库的关键枢纽，其微小变化都显著影响着全球碳循环和碳平衡[1-2]。黄土高原地处干旱、半干旱气候区，黄土深厚，土壤资源丰富，碳库储量大，处于我国生态极敏感区且地表CO_2通量不稳定[3-6]。同时，黄土高原作为半干旱向半湿润的过渡地区，土地利用方式多样，不合理的土地利用方式会影响土壤和植物的固碳能力，使地表碳排放不稳定的现象加剧[7-9]。目前，在黄土高原地区开展的大规模退耕还林，是以生态建设为目的调整不合理土地利用方式的具体体现，科学的土地利用方式可以增加土壤的固碳能力，从而减缓全球变暖[10-12]。

土壤呼吸也可定义为土壤表面CO_2通量，土壤呼吸不仅包含自养呼吸还包括异养呼吸，并且在整个过程中受到其他环境因子的影响：温度、水分、光照和有机质等，同时土壤呼吸复合控制机制在多种时空尺度上的交互作用，使得土壤呼吸机理的过程变得更加复杂[13-14]。关于土壤呼吸主要影响因子的分析表明，土壤呼吸速率是由多种影响因子相互影响共同决定的，土壤温度和土壤含水率在土壤呼吸中起到主导作用[15]。由于温度是调节和控制许多生态学过程的关键因素，所以土壤碳循环中多个环节会直接或间接受到温度的影响，土壤呼吸是随着温度的上升而增加[16-18]。土壤含水率也对土壤呼吸有着极大的影响，影响方式也更为复杂，含水率过高或过低都会抑制土壤呼吸[19]。土壤有机质是土壤呼吸的重要基质，且与土壤呼吸速率呈正相关[20]。土地利用方式会影响大气当中的CO_2的碳含量，并且不同的土地利用方式对于土壤呼吸所产生的影响也略有不同[21]。农田生态系统作为人类活动较为密集的区域，其抑制土壤释放CO_2到大气环境，对减缓全球变暖有着积极作用[22]。

在黄土高原土壤侵蚀与生态恢复综合治理过程中，小流域是基本结构单元[23]。过往的研究集中在单一植被类型或单一生态系统，而本文以黄土丘陵沟壑区清凉寺沟流域为研究对象，通过利用LI-8100A土壤碳通量自动测量系统，对晋西北黄土区

收稿日期： 2020-11-11； **修订日期：** 2021-04-03
基金项目： 国家自然科学基金面上基金项目(41671213)；陕西省博士后科学基金项目(2016BSHEDZZ27)
作者简介： 许志平(1995-)，男，硕士研究生，主要研究方向为环境污染评价与治理. E-mail: 192060@snnu.edu.cn
通讯作者： 邵天杰. E-mail: tjshao@snnu.edu.cn

不同土地利用类型土壤CO_2通量进行系统分析。在研究区域结合时间和空间双重尺度的情况下，同时综合环境因子研究土壤表面CO_2通量的变化特征，以此分析土壤呼吸对碳汇的影响。黄土丘陵沟壑区土壤CO_2通量对土地利用和气候因素的响应、以及其变异规律是该地区生态建设、土地利用结构优化的重要基础，这对于未来执行合理的农田管理措施和土地利用方式并进一步减缓甚至改善气候变暖有着重要意义。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区域为清凉寺沟流域，位于黄土高原中东部，黄河以东，地势北高南低，为黄河东岸的一级支流，隶属于山西省吕梁市临县，地理坐标为110°45′~110°55′E，37°45′~38°5′N（图1）。清凉寺沟流域主要为黄土覆盖，丘陵沟壑发育，黄土地层相对简单、流域边界清楚、流域面积规模适当。严重的水土流失使得流域内地形支离破碎、沟壑纵横，是典型的

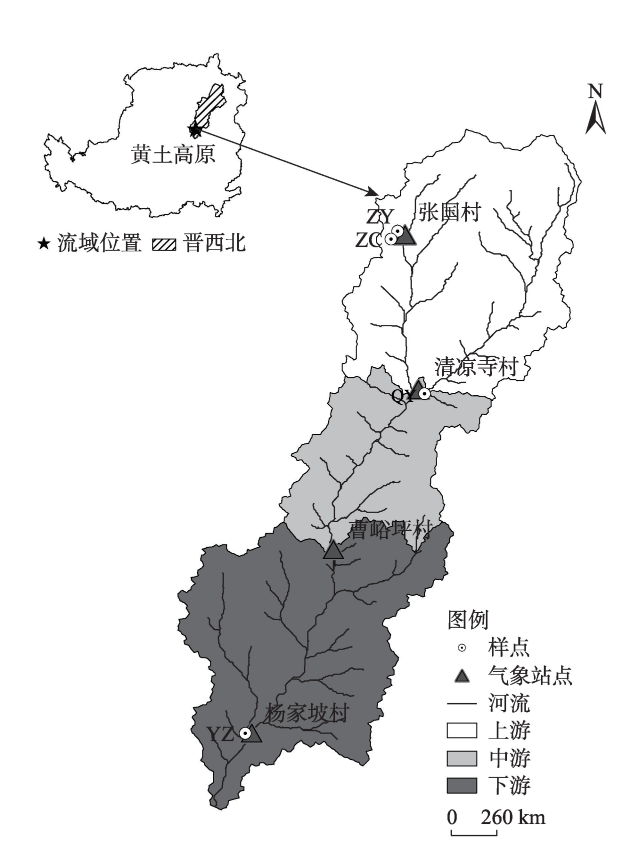


图1　清凉寺沟流域地貌示意图

Fig. 1　Overview map of watershed geomorphology in the study area

黄土丘陵沟壑区。属大陆性季风气候，四季分明、雨热同步、光照充足。春季干旱多风少雨，夏季炎热雨量集中。年均日照2487~2872 h，年均温度9.5 ℃，年均降水量仅437 mm。

根据研究区域水文站点、气象站点以及观测可行性，在清凉寺沟流域选择上、中、下游3个观测区，通过晋西北黄土区的资料收集和清凉寺沟流域的调查，当地土地利用类型除建筑用地外，主要为种植玉米、土豆为主的农耕地，以枣树、杏树为主的林地和已撂荒草地。因此，在观测区内选择荒草地、农耕地、枣林地3种典型土地利用类型。即上游张国村的荒草地（ZC）和农耕地（ZY）、中游清凉寺村的农耕地（QY）和下游杨家坡村的枣林地（YZ）。

1.2　研究方法

以山西临县清凉寺沟流域不同土地利用类型的地表CO_2通量作为研究对象，利用LI-8100A土壤碳通量自动测量系统对研究区域的农耕地、枣林地、荒草地进行生长季与非生长季的地表土壤CO_2通量的观测。根据研究区域1989—2019年气象数据，绘制年均降水量距平及年均温度距平图（图2）。2019年的年均降水量为442.5 mm，年均气温为9.39 ℃，其与1989—2019年的平均值近似。由图2可以看出，2019年是具有代表性的1 a，未出现极端气候条件，故观测于2019年进行。所有观测区每季度观测1次（每个观测区连续观测24 h），连续观测1个水文年。考虑到研究区春季干旱多风少雨，夏季炎热雨量集中，秋冬季大气温度较低，观测时间根据观测的环境因素选择近期无降水影响、气候条件正常的晴朗天气。时间的选择是因为要排除降水对于土壤含水率的影响；当天的气候条件要与往年同期的气象数据进行对比，避免大气温度过高或过低对于土壤CO_2通量的异常影响，晴朗天气是观测光合有效辐射的基本条件。观测分别于5月、8月以及11月进行。11月因夜间大气温度低于测量仪器的最低工作温度，故仅监测白天时段。

野外原位观测实施步骤与参数设置：先将10 cm短期调查气室的土壤环埋至样点，并露出地面2 cm，后将气室水平轻放于土壤环之上。其中样点选择在观测区内地表均匀平坦之处，避开虫洞、裂隙、细沟等地表破坏位置，刈割和清除土壤环内的植被和枯落物，并尽可能排除人为因素对于观测结果的

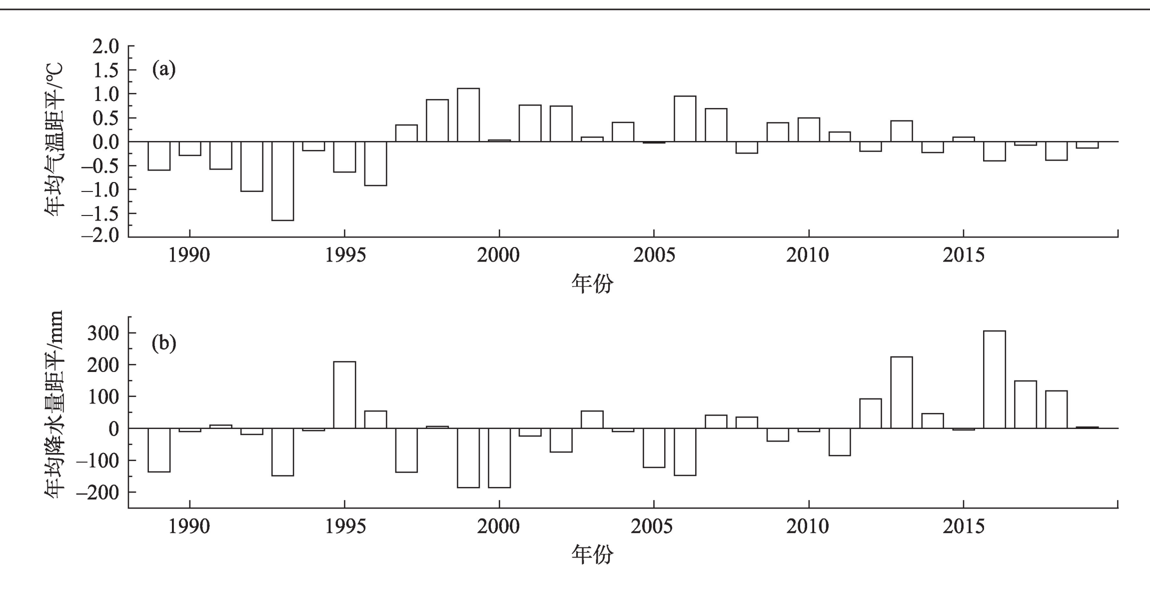


图2 1989—2019年年均降水量及年均气温距平

Fig. 2 Departures of average annual precipitation and annual temperature from 1989 to 2019

影响。在临近CO_2通量测量点将8100-203土壤温度探针和Delta-T Theta土壤湿度探针插入土壤5 cm深处测量土壤温度及土壤湿度。5月及8月对样点进行24 h观测，11月对样点进行白天时段观测，每0.5 h观测1次，并设置重复测量3次。观测时长设置为120 s，气室闭合与测量开始的时间设置为30 s，气室闭合前的混合时间设置为30 s，气室打开后的混合时间设置为45 s。光合有效辐射采用LI-8100A土壤碳通量自动测量系统配置的LI-190R光合有效辐射传感器测定，土壤温度采用LI-8100A土壤碳通量自动测量系统配置的8100-203土壤温度传感器测定，大气温度采用液体金属汞温度计测定。上述数据记录间隔均为0.5 h。

利用激光粒度分析仪(mastersizer 2000)对经过前期处理去除碳酸盐及有机质的野外采集的土壤样品进行粒度分析；采用化学滴定法对0~30 cm的土壤样品进行有机质测定以及利用烘干法测定0~30 cm土壤样品的含水率。

1.3 数据处理与质量控制

LI-8100A土壤碳通量自动测量系统所得的CO_2通量数据是利用测量数据进行的通量计算，并进行了校正，其最终数据的精度是读数的1.5%，零点漂移(℃$^{-1}$)<0.15 μmol·mol^{-1}，总漂移(℃$^{-1}$)为370 μmol·mol^{-1}<0.4，敏感性<0.1 μmol·mol^{-1}，计算公式如下：

$$F_C = \frac{10VP_o\left(1-\frac{W_o}{1000}\right)}{RS(T_o+273.15)}\frac{\partial C'}{\partial t}$$

式中：F_C(μmol·m^{-2}·s^{-1})是土壤CO_2排放通量；V(cm^3)为体积；P_o为初始压强(kPa)；W_o是初始水蒸气摩尔分数(mmol·mol^{-1})；S为所测土壤面积(cm^2)；T_o为初始气温(℃)；$\frac{\partial C'}{\partial t}$为水分校正后的$CO_2$摩尔分数(μmol·mol^{-1})的初始变化速率。

所以仅需对CO_2通量观测数据以2 h的时间间隔尺度进行严格筛选，剔除由于仪器故障以及人为操作失误导致的部分明显异常值即可。此外对于3次重复测量所得同一组测量数据利用公式$\sigma=\sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}}$进行标准误差计算，剔除原则为从时间序列中剔除大于2σ的数据，故观测数据保留小数点后有效位数2位。

在此基础上，选择FluxCV值较小的数据利用软件Origin 2016制图。上述数据处理与质量控制过程利用软件LI-8100 File Viewer 3.1.0以及Excel 2016完成。

2 结果分析

由图3a可知，清凉寺农耕地的CO_2通量的变化范围为0.51~1.86 μmol·m^{-2}·s^{-1}，平均浓度为0.98 μmol·m^{-2}·s^{-1}；张国村农耕地的CO_2通量变化范围0.37~2.40 μmol·m^{-2}·s^{-1}，平均浓度为1.04 μmol·m^2·s；杨家坡枣林地的CO_2通量变化范围为2.09~3.61 μmol·m^{-2}·s^{-1}，平均浓度为2.78 μmol·m^{-2}·s^{-1}；张国村荒草地的CO_2通量的变化范围为1.92~2.9 μmol·m^{-2}·

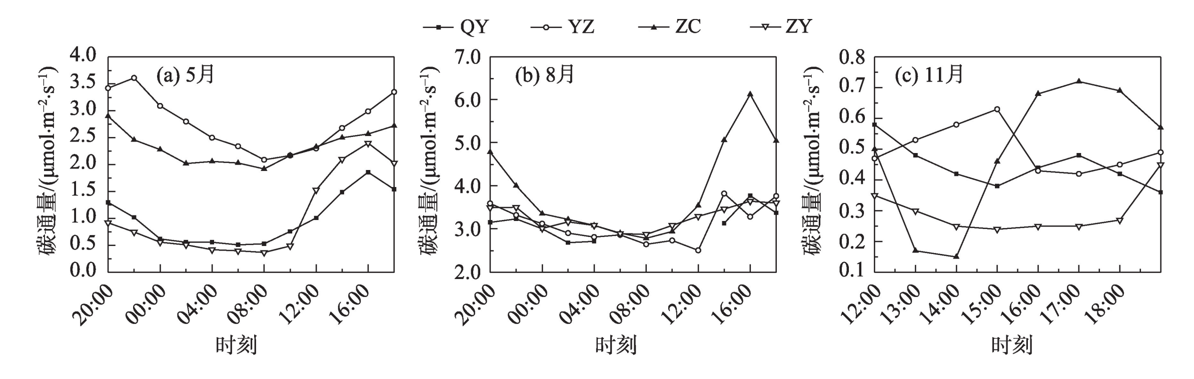


图3 不同季节CO_2通量昼夜变化

Fig. 3 Day and night variation of CO_2 flux in different seasons

s^{-1}，平均浓度为2.33 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$。4个观测区的$CO_2$通量整体均呈现规律单峰变化，最小值均出现在同一时间(8:00)。

由图3b可知，8月的地表CO_2通量观测数据表明：清凉寺农耕地的CO_2通量的变化范围为2.69~3.78 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$，平均浓度为3.14 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$，最低值出现在2:00，最高值出现在16:00；张国村农耕地的CO_2通量的变化范围为2.88~3.65 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$，平均浓度为3.26 $\mu mol \cdot m^{2} \cdot s^{-1}$，最低值出现在8:00，最高值出现在16:00；杨家坡枣林地的CO_2通量曲线呈不规律变化，变化范围为2.51~3.83 $\mu mol \cdot m^{2} \cdot s^{-1}$，最低值出现在12:00，最高值出现在14:00，平均浓度为3.12 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$；张国村荒草地的$CO_2$通量曲线呈现规律单峰变化，变化范围为2.79~6.13 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$，最低值出现在8:00，日出之后$CO_2$通量逐渐上升，于16:00达到单日峰值，后逐渐下降，平均浓度为3.91 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$。8月因受到阴雨天气的影响，清凉寺农耕地无法监测6:00—12:00的CO_2通量数据，同时造成光合有效辐射的数据比预期低。

11月因气温较低，草本层处于休眠期，整体的CO_2通量处于较低的水平，并且呈现不规律变化(图3c)。地表CO_2通量观测数据表明：清凉寺农耕地、杨家坡枣林地、张国村荒草地、张国村农耕地的平均浓度分别为0.44 $\mu mol \cdot m^{2} \cdot s$、0.50 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$、0.49 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$、0.29 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$。

3 讨论

3.1 CO_2通量在不同土地利用类型下的时空变化特征

不同的土地利用方式会影响人类活动和自然过程对于碳循环的影响[24-25]。由研究区观测数据可知，不同土地利用方式CO_2通量浓度季节变化规律一致，均表现为8月的CO_2通量浓度最大，5月的CO_2通量浓度次之，11月的CO_2通量浓度最小(图3)。这可能与温度以及光合有效辐射对植物呼吸速率的影响有关。

5月CO_2通量由高到低为杨家坡枣林地、张国村荒草地、张国村农耕地以及清凉寺农耕地。农田土地利用措施的CO_2通量小于荒草地生态系统与林地生态系统的CO_2通量，这说明合理的土地利用措施对于土壤碳有一定的固定作用。与王剑等[10]、毛琴琴[11]等的研究结果相似，即科学的土地利用方式可增加固碳能力。4个观测区在日尺度上的CO_2通量最低值均出现在8:00，其中清凉寺农耕地和张国村农耕地的变化规律较为一致，随着日出后气温升高，CO_2通量也随之升高并在16:00达到最大值，后逐渐下降。杨家坡枣林地和张国村荒草地的变化规律较为一致，但两地的最大值分别出现在22:00和20:00。

8月CO_2通量整体平均浓度比5月高。4个观测区的CO_2通量十分接近，张国村荒草地的CO_2通量浓度略高于枣林地以及农耕地的CO_2通量浓度。这说明合理的管理措施对于碳平衡有着重要作用，完善管理措施也可促进荒草地生态系统的碳吸收[26]。张国村农耕地、清凉寺农耕地以及杨家坡枣林地三地的CO_2通量平均浓度相差仅0.1 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$，不同的土地利用类型显现出的差别并不明显。

11月CO_2通量浓度大幅下降，最大值不足0.80 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$，且均呈现不规律变化，说明在非生长季植物的凋谢对于CO_2通量影响较大。其中张国村荒草地的变化幅度最大，其平均浓度8—11月降低

了3.42 μmol·m^{-2}·s^{-1}。清凉寺农耕地的CO_2通量与杨家坡枣林地、张国村荒草地的CO_2通量较为接近，平均浓度相差仅仅0.05 μmol·m^{-2}·s^{-1}。张国村农耕地的CO_2通量最低，平均浓度与杨家坡枣林地以及张国村荒草地的CO_2通量相差0.20 μmol·m^{-2}·s^{-1}。

3.2 光合有效辐射、温度、土壤水分、土壤粒度以及土壤有机质与CO_2通量的相关性分析

3.2.1 *光合有效辐射对土壤表层CO_2通量的影响* 5月代表春季时期，杨家坡枣林地的CO_2通量与光合有效辐射呈微弱的负相关(图4a)，清凉寺农耕地、张国村荒草地以及张国村农耕地的CO_2通量是随着光合有效辐射的增加而增加，两者呈显著的正相关。光合有效辐射同地表的CO_2通量的相关性最为显著的是张国村荒草地，CO_2通量的变化幅度也最剧烈。8月所代表的夏季时期，各个观测区的CO_2通量和光合有效辐射均呈显著正相关(图4b)。但由于夏季阴雨天较多，光合有效辐射值均较小。其中张国村农耕地的光合有效辐射跨度最大，CO_2通量与其呈现紧密正相关。清凉寺农耕地、杨家坡枣林地以及张国村荒草地的光合有效辐射和CO_2通量的变化幅度均较小。这说明在生长季(即5月与8月)光合有效辐射与CO_2通量关系密切。如范连连等[27]不仅发现二者的密切关系，还指出光合有效辐射对于CO_2通量的影响主要是通过影响表层土壤的温度以及改变植被的光合作用的速率，即对光合作用的直接作用和气孔导度的间接作用进而影响群落碳截获。植被生理特性研究表明，光合作用的大小受光合有效辐射影响较大[28-29]。

11月所代表的秋/冬季时期，光合有效辐射较春、夏季有着明显的下降，CO_2通量也有着明显的下降(图4c)。其中，张国村荒草地和张国村农耕地的光合有效辐射较为强烈，与CO_2通量均呈微弱负相关。而杨家坡枣林地以及清凉寺农耕地的CO_2通量与光合有效辐射呈微弱正相关。在非生长季，植物的枯死使得光合有效辐射与CO_2通量的相关性变小。

3.2.2 *温度对土壤表层CO_2通量的影响* 由图5可知，5 cm深度的土壤温度的变化是随着大气温度的变化而变化，但变化反应总是滞后于大气温度。当大气温度达到日尺度的峰值时(5月为16:00、8月为14:00)，土壤温度会在这之后达到日尺度的峰值。在生长季CO_2通量是随着温度的变化而变化，但总滞后于温度的变化。

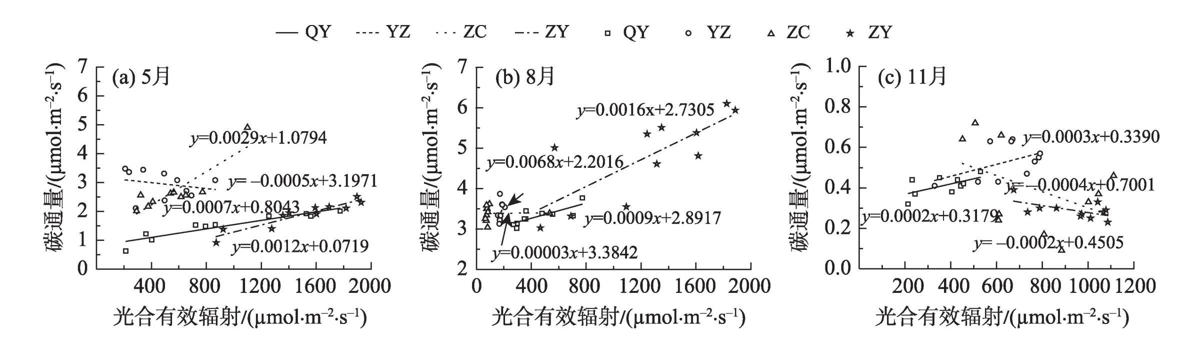


图4 CO_2通量与光合有效辐射的关系

Fig. 4 Relationship between CO_2 flux and photosynthetically active radiation

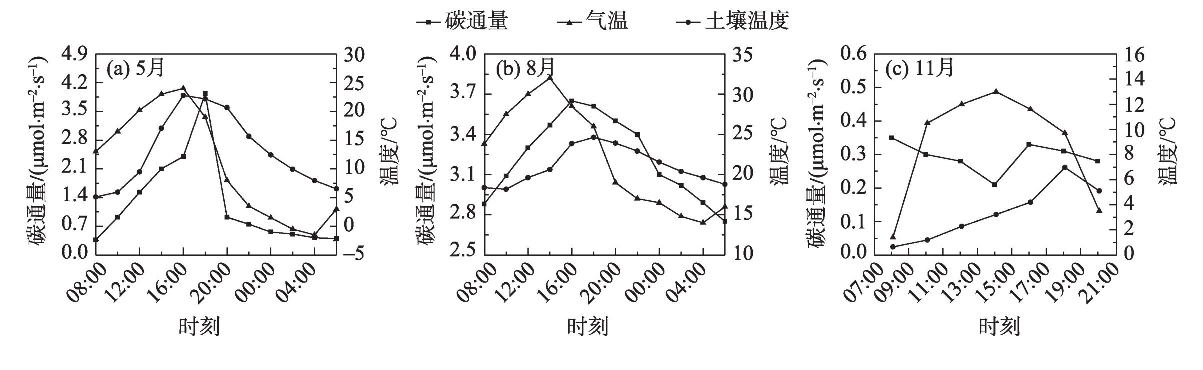


图5 CO_2通量与温度的关系

Fig. 5 Relationship between CO_2 flux and temperature

由图5a可知，大气温度在日出之后缓慢上升，土壤温度和CO_2通量也逐渐上升。16:00大气温度达到峰值时，土壤温度同样达到峰值，CO_2通量在18:00达到最大值，此后呈现显著下降趋势。8月的CO_2通量变化与土壤温度的变化较为一致，大气温度在14:00达到日尺度峰值，但土壤温度仍持续上升并在18:00达到单日峰值(图5b)。在日出之后，土壤表层的CO_2通量迅速上升，并在16:00达到日尺度峰值，随后变化呈迟缓下降趋势。当土壤温度高于大气温度后，CO_2通量开始下降，说明温度在适宜的范围内升高会提升土壤中微生物的活性，以此提高土壤呼吸的速率，而超过一定范围，温度过高则会使土壤中的微生物失活，土壤呼吸速率也随之降低[30-31]。

11月的土壤温度随大气温度的变化而变化，在日出之后大气温度迅速上升并在14:00达到日变化峰值，后逐渐下降。土壤温度则上升缓慢，在18:00达到日变化峰值。但CO_2通量在日尺度上呈现不规律变化，最大值出现在日出之时，后逐渐下降，当大气温度达到最大值时，CO_2通量处于最小值，后略有回升(图5c)。由于温度后续持续下降，CO_2通量也随之下降。但是冬季日过程的CO_2通量整体变化幅度较小，仅在0.2~0.4 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$之间浮动。温度不仅影响着土壤微生物的活性、群落结构，还影响着植物的光合作用以及根系的呼吸速率[32]。说明温度的降低与植物的枯死对于土壤CO_2通量的影响较大，使得非生长季的CO_2通量浓度偏低。这与范月君等[16]发现温度过高或过低会限制土壤呼吸，但温度不能长期使土壤呼吸增加的观点基本一致。

3.2.3　土壤粒径分布特征及其对CO_2通量的影响　晋西北黄土丘陵沟壑区的气候相对于关中平原、渭北旱塬等典型黄土区而言更为干旱少雨，其土壤质地更粗，除少数裸露的基岩、沙砾河漫滩外，晋西北地区主要为砂质土壤类型，因此砂质类型的土壤质地在晋西北黄土区占主导地位，具有较好的典型性和代表性。研究区内主要分布黑垆土，黑垆土在我国西北黄土侵蚀地区广泛分布，是我国西北黄土地区的主要土类[33]。黑垆土分布区界限西至临夏、兰州一线，南至天水、宝鸡、韩城一线，东至太原、大同一线，北至兰州、靖边、大同一线。Zhu等[34]将黑垆土分为典型黑垆土、黏黑垆土、轻黑垆土和草甸黑垆土，加上黑麻土共5个亚类。研究区的黑垆土属黏黑垆土亚类。在土壤CO_2通量研究中，土壤粒径分布特征对于土壤CO_2通量影响的相关研究较少，也是被忽略的一环。不同质地的土壤，其土壤CO_2通量有较为明显的差异，准确掌握不同质地下土壤CO_2通量变化特征对于高效利用土地以及控制碳排放具有重要指导意义，因此深入研究土壤质地对于碳通量的影响十分必要。本文将观测区YZ、QY、ZC、ZY采集的表层土壤样品使用激光粒度分析仪进行分析，将各观测区的样品粒径数据绘制成Shepard三角图(图6)。根据研究区4个样点耕作层土壤的粒度含量分布特征可知，各监测点的粒径水平相当，各剖面的粒度含量分布特征较为接近。

根据张国村农耕地(ZY)和清凉寺农耕地(QY)表层土壤的粒度含量分布特征可知，黏土和粉砂含量特征较为接近，两者的黏土含量与粉砂含量之和均超过50%，分别占据总含量的53.14%和54.31%。

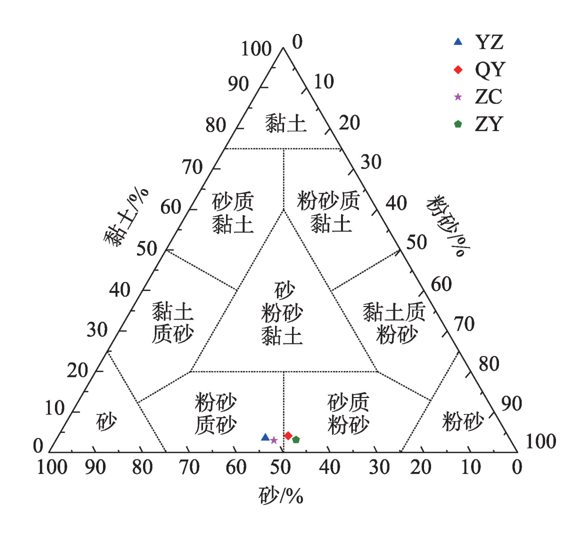


图6　土壤粒径含量分布

Fig. 6　Soil particle size distribution

杨家坡枣林地以及张国村荒草地的砂含量超过了50%，分别占总含量的52.00%和50.47%。在黄土丘陵沟壑区流域内土壤颗粒中黏土体积分数较低，粉砂和砂占据主导地位[35]。根据图6可以看出，农耕地的土壤类型属砂质粉砂，荒草地和枣林地的土壤类型属粉砂质砂，研究区的土壤质地属砂质壤土，既可以代表晋西北黄土丘陵沟壑区，也可以根据黑垆土的分布区实际应用在黄土高原大部地区。陈书涛等[36]发现土壤质地与土壤中气体的扩散速率呈密切关系，土壤质地既影响植物根系和土壤微生物对于O_2的获取又影响生物呼吸所产生的CO_2的释放。因此土壤砂含量较高的土地利用类型会促进

土壤中CO_2的释放并且会加快气体的扩散速率。故生长季农耕地的CO_2通量小于枣林地和荒草地的CO_2通量。4个观测区的土壤平均粒径由大到小为：杨家坡枣林地、张国村荒草地、张国村农耕地以及清凉寺农耕地，与4个观测区的CO_2通量大小关系一致，表明土壤质地对于碳排放有显著影响，当土壤较为紧实时，会抑制土壤气体的释放，增加土壤中固碳定量。农耕地的土壤粒径相较于枣林地和荒草地的土壤粒径小，这说明有效的土地利用类型经过长时间的作用可能会改变土壤质地。质地优良的土壤，土层中黏土和粉砂质土比重大，土壤持水能力强，土壤有机质含量及分解速率大于土质低劣的土壤，因而具有较高的呼吸速率[37]。

3.2.4 土壤含水率与土壤有机质对于CO_2通量的影响　土壤含水率是影响表层土壤CO_2通量的环境要素之一，对植被的生长、根系分布和微生物活性等与土壤CO_2通量密切相关的生物因子起重要控制作用[38]。陈全胜等[19]发现对于CO_2通量来说接近田间持水力是最佳水分状态，当土壤处于过干或过湿状态时，土壤呼吸就会受到抑制。

从整体来看，不同月份的耕作层含水率整体变化趋势为8月<5月<11月。从个体来看，杨家坡枣林地的8月含水率为3个月最高，这一特点与其他地点的不同月份的含水率大小规律相比呈相反态势（表1）。这是由于地理因素导致，在夏季降雨增多时，雨水流向下游低处的杨家坡观测区。在生长季，土壤含水率较低的2个地点（YZ和ZC）CO_2通量反而较高。在非生长季，土壤含水率整体维持在12%左右，进而CO_2通量的变化较小。说明土壤含水率对于土壤CO_2通量的影响呈现抑制作用，含水率较低的地方CO_2通量则较高。可能是由于土壤含水率较高会限制凋落物的分解以及水分进入土壤孔隙当中，进而阻碍土壤呼吸作用[39]。砂质壤土的最优含水率一般为12%~15%，黄土为19%~21%，可见本研究区的含水率较低，进而造成CO_2通量较小，这与陈全胜等[19]研究结果一致。

土壤有机质与土壤CO_2通量的关系密切，土壤有机质的含量不同对于土壤呼吸的影响也有显著差异，土壤呼吸受有机质活性组分的影响，土壤有机质含量与土壤呼吸速率呈正相关关系[40]。5月4个观测区的有机质含量在9%左右浮动，整体较为接近。杨家坡枣林地及张国村荒草地的有机质含量相较于农耕地的有机质含量（8%）分别高1.9%和1.4%，CO_2通量同有机质含量特征呈较为明显的正相关关系。8月农耕地类型土壤有机质含量相较于5月的土壤有机质含量有略微上升，但变化较小。杨家坡枣林地的土壤有机质含量（11%）有着明显的上升，而张国村荒草地的土壤有机质含量（5%）则有着明显的下降。张国村农耕地的CO_2通量明显高于其他三地的CO_2通量，并且其他三地的CO_2通量整体变化幅度较小。这是因为在生长季时期，温度和光合有效辐射对于CO_2通量的影响大于土壤有机质对于CO_2通量的影响。11月杨家坡枣林地的有机质降至8.9%左右，清凉寺农耕地则显著上升至11.2%，张国村荒草地及张国村农耕地的有机质含量则在5.5%左右。整体来看，张国村荒草地和张国村农耕地的CO_2通量较低，杨家坡枣林地和清凉寺农耕地的CO_2通量较高，与有机质的变化趋势较为一致。说明在非生长季微生物的失活以及植物的凋谢导致温度与光合有效辐射对CO_2通量的影响小于土壤有机质对CO_2通量的影响。

表1　不同季节表层土壤含水率及土壤有机质含量

Tab. 1　Surface soil moisture content and soil organic matter content in different seasons

月份	地点	土壤含水率/%	有机质含量/%
5	YZ	6.66	9.92
5	QY	10.90	8.09
5	ZC	8.84	9.42
5	ZY	13.62	8.04
8	YZ	15.54	11.84
8	QY	5.51	8.50
8	ZC	4.65	5.02
8	ZY	6.86	8.30
11	YZ	12.03	8.92
11	QY	12.05	11.22
11	ZC	14.24	5.59
11	ZY	12.75	5.40

4　结 论

（1）研究区地表土壤CO_2通量的昼夜变化规律特征为：在生长季呈现单峰变化，于16:00—22:00达到单日最高值，在日出左右达到单日最低值；在非生长季则呈现不规律变化。

（2）CO_2通量的时空特征为：农耕地的CO_2通量与荒草地、枣林地相比要低，表明合理的土地利用

措施对碳排放有着积极作用；同时，不同季节的CO_2通量关系为：8月CO_2通量>5月CO_2通量>11月CO_2通量，这与5月及8月研究区降水充足、气候温暖适宜、植被处于生长期，土壤根系和土壤微生物呼吸速率较快相关。

（3）光合有效辐射和大气温度影响着土壤温度，并且三者同CO_2通量有显著正相关关系。土地利用类型以及含水率对于土壤质地也有不同影响，科学的土地利用类型会减小土壤孔隙度，进而提高土壤固碳能力。土壤高含水率对地表土壤CO_2通量起抑制作用；有机质在生长季并非主导因素，在非生长季则占据主导位置，同CO_2通量呈负相关关系。

参考文献(References)：

[1] 王春梅, 邵彬, 王汝南. 东北地区两种主要造林树种生态系统固碳潜力[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1764-1772. [Wang Chunmei, Shao Bin, Wang Runan. Carbon sequestration potential of ecosystem of two main tree species in Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1764-1772.]

[2] 李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 351-357. [Li Yuning, Wang Guanyu, Li Wei. Soil respiration and carbon cycle[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9 (2): 351-357.]

[3] Luo H , Oechel W C , Hastings S J , et al. Mature semiarid chaparral ecosystems can be a significant sink for atmospheric carbon dioxide[J]. Global Change Biology, 2007, 13(2): 386-396.

[4] 夏彬, 朱世硕, 郝旺林, 等. 黄土丘陵区土壤有机碳含量对侵蚀坡面表层土壤含水量时空变化的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 175-181. [Xia Bin, Zhu Shishuo, Hao Wanglin, et al. Effects of soil organic carbon content on temporal and spatial changes of surface soil water content on eroded slope in the Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34 (3): 175-181.]

[5] 闫丽娟, 李广, 吴江琪, 等. 黄土高原4种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5546-5554. [Yan Lijuan, Li Guang, Wu Jiangqi, et al. Effects of four typical vegetations on soil active organic carbon and soil carbon in Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5546-5554.]

[6] Ran Lishan, Li Lingyu, Tian Mingyang, et al. Riverine CO_2 emissions in the Wuding River catchment on the Loess Plateau: Environmental controls and dam impoundment impact[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017, 122(6): 1439-1455.

[7] 李欣雨, 夏建国, 鄢广奎, 等. 名山河流域不同土壤类型和土地利用方式下有机碳的分布特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 224-230, 238. [Li Xinyu, Xia Jianguo, Yan Guangkui, et al. Distribution of organic carbon under different soil types and utilization patterns in Mingshan River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 224-230, 238.]

[8] 张英英, 蔡立群, 武均, 等. 不同耕作措施下陇中黄土高原旱作农田土壤活性有机碳组分及其与酶活性间的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 1-7. [Zhang Yingying, Cai Liqun, Wu Jun, et al. The relationship between soil labile organic carbon fractions and the enzyme activities under different tillage measures in the Loess Plateau of central Gansu province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(1): 1-7.]

[9] 彭文英, 张科利, 杨勤科. 退耕还林对黄土高原地区土壤有机碳影响预测[J]. 地域研究与开发, 2006(3): 94-99. [Peng Wenying, Zhang Keli, Yang Qinke. Forecast of impact of the returning farms to forests on soil organic carbon of Loess Plateau[J]. Areal Research and Development, 2006(3): 94-99.]

[10] 王剑, 薛东前, 宋永永, 等. 基于农地利用的黄土高原碳排放变化及预测研究[J]. 资源开发与市场, 2018, 34(9): 1250-1255. [Wang Jian, Xue Dongqian, Song Yongyong, et al. Carbon emissions and prediction on loess plateau based on farmland utilization [J]. Resources Development & Market, 2018, 34(9): 1250-1255.]

[11] 毛琴琴. 退耕还林(草)以来黄土高原地区土壤有机碳库的变化[D]. 西安: 西安科技大学, 2019. [Mao Qinqin. Changes of Soil Organic Carbon Pool in the Loess Plateau Following the "Grain for Green"[D]. Xi' an: Xi' an University of Science and Technology, 2019.]

[12] 刘冠, 李国庆, 李洁, 等. 基于InVEST模型的1999—2016年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38 (1): 267-274. [Liu Guan, Li Guoqing, Li Jie, et al. Study of carbon stock changes and spatial patterns in the Mahta watershed from 1999-2016 based on the InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 267-274.]

[13] 张风霞. 科尔沁沙地农田生态系统土壤呼吸与碳平衡特征[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014. [Zhang Fengxia. Characteristics of Soil Respiration and Carbon Balance of Agriculture Ecosystem in Horqin Sandy Land[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.]

[14] 赵娜. 太行山南段低丘区不同土地利用方式土壤碳通量组成及其影响机理[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014. [Zhao Na. The Components and Infiuence Mechanism of Soil Carbon Flux under Different Lan Use Types in Hilly Area of Southern Taihang Mountains, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.]

[15] 唐庆兰, 任世奇, 项东云, 等. 尾巨桉萌芽林土壤呼吸变化及其与土壤温度和土壤含水率的关系[J]. 西部林业科学, 2015, 44 (2): 69-73, 79. [Tang Qinglan, Ren Shiqi, Xiang Dongyun, et al. Soil respiration variations and their relationships with soil temperature and soil moisture content in *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* sprout forest [J]. Journal of West China Forestry Science, 2015, 44(2): 69-73, 79.]

[16] 范月君, 侯向阳, 石红霄, 等. 气候变暖对草地生态系统碳循环的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(3): 294-302. [Fan Yuejun, Hou Xiangyang, Shi Hongxiao, et al. Effect of carbon cycling in grassland ecosystems on climate warming[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(3): 294-302.]

[17] 陈栋, 郁红艳, 邹路易, 等. 土壤碳转化对大气CO_2升高响应机制研究进展[J]. 核农学报, 2017, 31(8): 1656-1663. [Chen Dong, Yu Hongyan, Zou Luyi, et al. Research progress on soil carbon transformation mechanism responses to elevated atmospheric CO_2[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(8): 1656-1663.]

[18] 卫云燕, 尹华军, 刘庆, 等. 气候变暖背景下森林土壤碳循环研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(6): 888-894. [Wei Yunyan, Yin Huajun, Liu Qing, et al. Advance in research of forest carbon cycling under climate warming[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2009, 15(6): 888-894.]

[19] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 972-978. [Chen Quansheng, Li Linghao, Han Xingguo, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 972-978.]

[20] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 155-165. [Zhao Yali, Xue Zhiwei, Guo Haibin, et al. Effects of tillage and crop residue management on soil respiration and its mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(19): 155-165.]

[21] 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1017-1025. [Chen Shutao, Liu Qiaohui, Hu Zhenghua, et al. Factors influencing the spatial variability in soil respiration under different land use regimes[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 1017-1025.]

[22] 刘昱, 陈敏鹏, 陈吉宁. 农田生态系统碳循环模型研究进展和展望[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 1-9. [Liu Yu, Chen Minpeng, Chen Jining. Progress and perspectives in studies on agro-ecosystem carbon cycle model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(3): 1-9.]

[23] 张瑞, 曹华, 王云强, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分空间变异性及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 52-58. [Zhang Rui, Cao Hua, Wang Yunqiang, et al. Spatial variability of soil moisture and its influencing factors in small watersheds in loess hilly and gully regions[J]. Research on Soil and Water Conservation, 2012, 19(5): 52-58.]

[24] Houghton R A, Hackler J L. Sources and sinks of carbon from land-use change in China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(2): 1034. DOI: 10.1029/2002GB001970.

[25] 赵荣钦, 黄贤金, 刘英, 等. 区域系统碳循环的土地调控机理及政策框架研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(5): 51-56. [Zhao Rongqin, Huang Xianjin, Liu Ying, et al. Mechanism and policy framework for land regulation of carbon cycle of regional system[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(5): 51-56.]

[26] 马晓哲, 王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5898-5907. [Ma Xiaozhe, Wang Zheng. Progress in the study on the impact of land-use change on regional carbon sources and sinks[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): 5898-5907.]

[27] 范连连, 谢继萍, 马健, 等. 准噶尔盆地南缘草本层碳通量及土壤呼吸的变化特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2567-2573. [Fan Lianlian, Xie Jiping, Ma Jian, et al. Variation characteristics of herb layer carbon flux and soil respiration in southern edge of Jungggar basin, Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(10): 2567-2573.]

[28] Baldocchi D. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(11): 2415-2434.

[29] 王妍, 彭镇华, 江泽慧, 等. 长江滩地杨树林生态系统的碳通量特征[J]. 林业科学, 2009, 45(11): 156-160. [Wang Yan, Peng Zhenhua, Jiang Zehui, et al. Characteristics of carbon flux of populus forest in the reaches of Yangtze River in Hunan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(11): 156-160.]

[30] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2301-2311. [Yang Qingpeng, Xu Ming, Liu Hongsheng, et al. Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2301-2311.]

[31] 夏雪, 车升国. 陆地生态系统有机碳储量和碳排放的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(29): 214-218. [Xia Xue, Che Shengguo. Advance in organic carbon stock and carbon emission in terrestrial ecosystem[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(29): 214-218.]

[32] 陈龙飞, 何志斌, 杜军, 等. 土壤碳循环主要过程对气候变暖响应的研究进展[J]. 草业学报, 2015, 24(11): 183-194. [Chen Longfei, He Zhibin, Du Jun, et al. Response of soil carbon cycling to climate warming: Challenges and perspectives[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(11): 183-194.]

[33] 张淑光. 黄土侵蚀地区黑垆土的形成、分布和利用[J]. 水土保持学报, 1988, 2(3): 65-73. [Zhang Shuguang. Formation, distribution and utilization of black kiln soil in loess erosion areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1988, 2(3): 65-73.]

[34] Zhu Xianmo, Li Yushan, Peng Xianglin, et al. Soils of the loess region in China[J]. Elsevier, 1983, 29(3): 237-255.

[35] 茹豪, 张建军, 李玉婷, 等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 176-182. [Ru Hao, Zhang Jianjun, Li Yuting, et al. Fractal characteristics of soil particle size in the Loess Plateau and its effect on soil erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 176-182.]

[36] 陈书涛, 胡正华, 张勇, 等. 陆地生态系统土壤呼吸时空变异的

影响因素研究进展[J]. 环境科学, 2011, 32(8): 2184−2192. [Chen Shutao, Hu Zhenghua, Zhang Yong, et al. Review of the factors influencing the temporal and spatial variability of soil respiration in terrestrial ecosystem[J]. Environmental Science, 2011, 32 (8): 2184−2192.]

[37] Schimel D S, Stillwell M A. Woodmansee R G. Biogeochemistry of C, N, and P, in a soil catena of the short grass steppe[J]. Ecology, 1985, 66 (1): 276−282.

[38] 周萍, 刘国彬, 薛萐. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展[J]. 草业学报, 2009, 18(2): 184−193. [Zhou Ping, Liu Guobin, Xue Sha. Review of soil respiration and the impact factors on grassland ecosystem [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(2): 184−193.]

[39] 张一平, 沙丽清, 于贵瑞, 等. 热带季节雨林碳通量年变化特征及影响因子初探[J]. 中国科学 D辑: 地球科学, 2006, 36(增刊1): 139−152. [Zhang Yiping, Sha Liqing, Yu Guirui, et al. A preliminary study on the annual variation characteristics and influencing factors of carbon flux in tropical seasonal rain forest[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2006, 36(S1): 139−152.]

[40] 王新源, 李玉霖, 赵学勇, 等. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4890−4901. [Wang Xinyuan, Li Yulin, Zhao Xueyong, et al. Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4890−4901.]

Study on the change of surface CO_2 flux in sandy loamy soil under different land use types: An example from the Qingliangsi ditch watershed

XU Zhiping[1], SHAO Tianjie[1], ZHANG Liankai[2], SHAO Mingyu[2], NIU Junjie[3]

(1. School of Geographical Science and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, Shaanxi, China;
2. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, Guangxi, China;
3. Research Center for Scientific Development of Fenhe River Valley, Taiyuan Normal University, Taiyuan 030012, Shanxi, China)

Abstract: Global climate change is closely related to the carbon cycle, and exploring changes in surface carbon emissions is an essential aspect of climate change research. In this study, the CO_2 fluxes of surface soils in Qingliangsigou watershed of Loess Hills and Gullies in northwest Shanxi were measured using an LI-8100A soil carbon flux automatic measurement system, the soil particle size was measured using a laser particle size analyzer (mastersizer 2000), the soil organic matter was measured using a chemical titration method, and the soil water content was measured using the drying method. Additionally, we explored the diurnal and spatial variation of surface soil CO_2 fluxes, temporal and spatial changes, CO_2 fluxes under different land use types, and the influence of environmental factors on surface soil CO_2 fluxes to complement the study of surface soil CO_2 fluxes in small watershed areas in the Loess Hills and Gullies of northwest Shanxi. We found that CO_2 fluxes showed a single peak in variation during the growing season, reaching a single day minimum around sunrise and a single day maximum between 16:00 and 22:00, and in the non-growing season, there was irregular variation. The CO_2 fluxes of farmland were lower than the CO_2 fluxes of waste grassland and jujube forest land. The highest CO_2 fluxes were observed in August, followed by May, and the lowest CO_2 flux was in November. The CO_2 flux of surface soil was closely related to photosynthetic effective radiation, atmospheric temperature, soil temperature, soil water content, soil organic matter, and soil texture. Therefore, the carbon fixation of soil can be effectively improved through scientific land use. In conclusion, the results of this study can be applied to most of the Loess Plateau and used to improve the ecological environment.

Keywords: soil CO_2 flux; spatial and temporal variation characteristics; influencing factors; land use type; loess hilly gully area; northwest Shanxi